

На правах рукописи

БОГИНСКАЯ НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВАРИАЦИЙ ПОТОКА СЕЙСМИЧЕСКИХ
СОБЫТИЙ НА О. САХАЛИН ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ КАК ОСНОВА МЕТОДОВ СРЕДНЕСРОЧНОЙ
ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ LURR И СРП**

Специальность 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков
полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

с. Паратунка, Елизовский район, Камчатский край – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук

Научный руководитель: Закупин Александр Сергеевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Южно-Сахалинск, ведущий научный сотрудник лаборатории сейсмологии, заместитель директора по науке ИМГиГ ДВО РАН.

Официальные оппоненты: Шебалин Петр Николаевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, г. Москва, главный научный сотрудник лаборатории теории прогноза землетрясений.

Чебров Данила Викторович, кандидат физико-математических наук, Камчатский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Петропавловск-Камчатский, директор.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, г. Москва

Защита состоится «26» ноября 2020 г. в 10-00 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д999.004.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН), Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН), Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИКИР ДВО РАН) по адресу: 684034, Камчатский край, Елизовский район, п. Паратунка, ул. Мирная, д. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках ИМГиГ ДВО РАН, ИВиС ДВО РАН, ИКИР ДВО РАН и на сайтах: www.imgg.ru, www.ikir.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <http://vak.ed.gov.ru/> и на сайтах www.imgg.ru, www.ikir.ru.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экземплярах направлять по адресу: 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б. Тел/факс (8 4242) 791-517, E-mail: andreeva-mu@mail.ru, ученому секретарю диссертационного совета Марине Юрьевне Андреевой.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2020 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д999.004.03,
кандидат физико-математических наук

М.Ю. Андреева

Общая характеристика работы

Актуальность исследования. Три самых разрушительных землетрясения за последние 30 лет на о. Сахалин (Нефтегорское 1995 г. с магнитудой $M=7.2$ на северо-востоке острова, Углегорское 2000 г., $M=7.0$ в центральной его части, и Невельское 2007 г., $M=6.2$ на юге) указали на более высокий уровень сейсмической опасности этого региона, чем это было предусмотрено в картах по общему сейсмическому районированию (8-9 баллов по шкале MSK-64 при $T=500$ лет). Этими событиями было инициировано развитие сети сейсмических станций на о. Сахалин и организация полноценной сейсмологической службы в начале 2000-х годов. В 2011 году сеть Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы Российской академии наук (СФ ФИЦ ЕГС РАН) стала полностью цифровой, а каталоги землетрясений получили высокую представительность за счет плотной сети (особенно на юге острова). Это способствовало более детальному исследованию сейсмического режима, включая разработку новых подходов к прогнозам землетрясений (ЗЛТ) и адаптации имеющихся методик для местных условий.

Исключительная сложность задачи прогноза предполагает определенную этапность ее решения. Для района северного Сахалина была показана возможность среднесрочного прогноза одной из самых трагичных катастроф в России - Нефтегорского ЗЛТ 1995 г. ($M_w=7.2$) с помощью алгоритма M8. Настройка алгоритма выполнялась на данных регионального каталога Геофизической службы РАН без афтершоков за последние 15 лет, начиная с 1964 г. [Тихонов, 2000].

В декабре 2005 г. сейсмологами Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН) был подготовлен долгосрочный прогноз сильного ЗЛТ на юго-западном шельфе о. Сахалин с $M_{LN}=6.6\pm 0.6$. Основой прогноза послужили предвестники - сейсмические бреши первого рода и второго рода, которые были надежно картированы на юго-западном шельфе острова вблизи гг. Невельск, Холмск по историческим данным о сильных ЗЛТ и данным сети цифровых сейсмических станций на юге о. Сахалин. Началом его реализации явилось Горнозаводское ЗЛТ 17.08.2006 года с магнитудой $M_w=5.6$. Через 6 дней после его начала Тихоновым И.Н. и Ким Ч.У. был подготовлен среднесрочный прогноз более сильного события в этом районе. Примерно через год долгосрочный и среднесрочный прогнозы полностью реализовались Невельским ЗЛТ 2.08.2007 г. с магнитудой $M_w=6.2$ ($M_{LN}=6.2$) [Тихонов, 2006; Тихонов, 2008].

Следуя логике стадийности сейсмического процесса в дополнение к среднесрочным (или скорее долгосрочным) методам оценки сейсмической опасности Тихонов И.Н. применил метод саморазвивающихся процессов (СРП), который описывает поведение разрушающейся системы на самой последней стадии [Малышев, 1991]. Ретроспективно было проведено моделирование по методу СРП для юга о. Сахалин на детальном каталоге землетрясений с $M\geq 2.6$ за 12-летний (2003-2014 гг.) период наблюдений для восьми ЗЛТ с $M\sim 4.6-6.2$. Для каждого из них получены даты реализации прогнозов. При этом ошибка прогноза во времени составила не более суток. Авторы отмечали, что реальная точность прогноза могла бы быть выше при наличии более детального ($M\geq 2.0$) каталога землетрясений, получаемого в реальном времени, по югу о. Сахалин [Тихонов и др., 2017].

После 2014 года на о. Сахалин произошло несколько сильных землетрясений, сейсмическая сеть обеспечила представительность каталогов землетрясений с $M>3.0$ на севере и $M\geq 1.5$ на юге о. Сахалин. Улучшение регистрационных возможностей определяет перспективы для мониторинга сейсмической опасности в реальном времени. В настоящее время актуальным в этой связи является продолжение работы с уже известными методами прогноза землетрясений, а также внедрение новых методик и алгоритмов, ранее не применявшихся на Сахалине.

В настоящей работе показаны результаты исследований, которые дают возможность эффективного последовательного применения методов прогноза LURR (Load-Unload response ratio) и СРП, опирающихся на современные модели процесса разрушения геосреды.

Цель работы. Поиск устойчивых среднесрочных пространственно-временных закономерностей потока сейсмичности на о. Сахалин перед сильными землетрясениями, для разработки методологии и алгоритмов, сужающих временные рамки прогноза сейсмических событий.

В соответствии с этим решались следующие **задачи**:

1. Выбрать физические модели для исследования сейсмического режима в период подготовки сильных землетрясений с учетом тектонических и сейсмических особенностей о. Сахалин.
2. На основе выбранных моделей провести расчеты в основных сейсмогенерирующих областях о. Сахалин на имеющемся программном обеспечении, в которых за выбранный период инструментальных наблюдений были зафиксированы землетрясения с $M \geq 5.5$.
3. По результатам расчетов выделить характерные этапы развития сейсмического процесса, основные точки перехода режима в различные состояния, временные пределы применимости методов и общие закономерности, позволяющие их последовательное применение в рамках разработанного алгоритма.
4. Оценить возможность применения предложенного алгоритма для прогноза сейсмической опасности на территории о. Сахалин.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Аномальные значения параметра LURR наблюдались на территории Сахалина в шести областях с линейными размерами не более 200 км за 1-2 года до сильных землетрясений ($M > 5.5$) в период с 1988 по 2017 гг.
2. Определены универсальные параметры для обработки сейсмических каталогов, при которых аномалии LURR не обнаружены в спокойные периоды, а в качестве предвестников зарегистрированы в 75% случаев (6 из 8 землетрясений с $M > 5.5$).
3. После появления предвестника LURR в течение 1-2 лет в сейсмическом процессе наблюдаются режимы с обострением (определяемые как саморазвивающиеся процессы), последний из которых реализуется от недели до 2.5 месяцев до сильного землетрясения, при том, что общее число таких режимов в 100% случаев не превышает двух.

Методы исследования

В данном исследовании использовался комплекс методов: последовательное применение методов LURR и СРП. Результаты в части выполнения расчетов по методу LURR получены с помощью программного комплекса «Seis-ASZ», который был разработан в ИМГиГ ДВО РАН [Закупин, 2016]. Для анализа данных каталогов ЗЛТ при помощи алгоритма СРП применялся программный комплекс «SeisDynamicsView», который был любезно предоставлен А.И. Малышевым из Института геологии и геохимии Уральского отделения Российской академии наук (ИГГ УрО РАН).

Научная новизна работы заключается в том, что впервые предложен подход для описания сейсмического режима в период подготовки сильных ЗЛТ на о. Сахалин. Данный подход показал большой процент успешных реализаций прогнозов за более чем 30-й период сейсмических наблюдений, как в ретроспективе, так и в реальном времени. Последовательно использованы методики оценки сейсмической обстановки на различных этапах подготовки сильных землетрясений LURR и СРП. Высокая степень реализации прогнозов обусловлена тем, что настройка методик проводилась в ходе многолетней работы в режиме реального времени и адаптирована к региональным особенностям сейсмического режима о. Сахалин.

Достоверность результатов и выводов обеспечивается использованием подходов и методов исследования, ранее апробированных и взаимно дополняющих друг друга (методы LURR и СРП); надежными алгоритмами обработки данных; согласованностью результатов с результатами работ других авторов по смежной тематике, а также подтверждением результатов, полученных ретроспективно при проведении компьютерного моделирования.

Обоснованность результатов подтверждается согласованностью и непротиворечивостью полученных результатов по отношению к более ранним исследованиям других ученых.

Практическая значимость. Результаты исследований могут быть использованы для разработки аналитических систем по прогнозу сейсмической опасности на о. Сахалин.

Алгоритм, предложенный в данной работе, может быть положен в основу автоматизированного комплекса, работающего в системе автоматического сбора и анализа сейсмологической информации СФ ФИЦ ЕГС РАН на основе специализированных программных комплексов, которые прошли этапы настройки и длительного тестирования на данных каталогов ЗЛТ других регионов, как в ретроспективном, так и в реальном режимах обработки.

В настоящее время данная методология используется при выработке решения по сейсмической опасности на о. Сахалин на заседаниях Сахалинского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (СФ РЭС). Практическая значимость исследований подтверждена результатами успешных реальных прогнозов последних сахалинских землетрясений: Онорского 2016 г. ($M_w=5.8$) и Крильонского 2017 г. ($M_w=5.0$) (протокол заседаний СФ РЭС № 3 от 11.05.2016 г., протокол заседаний СФ РЭС № 2 от 16.03.2017 г.).

Работа выполнена в соответствии с научными темами и планами работ ИМГиГ ДВО РАН по государственному заданию (ответственный исполнитель); проектом Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) №18-07-00966 «Исследование триггерных деформационных эффектов по данным о сейсмичности о. Сахалин с применением сейсмических датчиков нового типа» (исполнитель).

Личный вклад. Автор принимал непосредственное участие в подготовке сейсмических каталогов для проведения расчетов на выбранных компьютерных моделях на специализированном программном обеспечении.

Автором лично выполнены расчеты параметров LURR и СРП перед сильнейшими землетрясениями на о. Сахалин, начиная с 1988 года (с предысторией для каждого события в несколько лет).

Самостоятельно и вместе с соавторами участвовала в подготовке публикаций по теме работы, обобщению материала и формулировке выводов.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 8 статьях в рецензируемых научных журналах, из них 4 – в изданиях, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией, 1 проиндексирована в реферативной базе SCOPUS и 1 в реферативной базе WOS, 2 статьи в журналах, индексируемых РИНЦ. По теме диссертации опубликовано 8 статей в сборниках материалов всероссийских и международных конференций.

Апробация работы. Результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, были представлены на международных и всероссийских научных мероприятиях, в том числе: XVII международной конференции по науке и технологиям Россия-Корея-СНГ 15-17 июня 2017 г., г. Южно-Сахалинск; V молодежной тектонофизической школе-семинаре 09-12 октября 2017 г., г. Москва; VI научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» 02-07 октября 2017 г., г. Петропавловск-Камчатский; Международной юбилейной научной конференции посвященной 40-летию со дня образования научной станции РАН в г. Бишкеке 03-07 июля 2018 г., г. Бишкек; III международной научной конференции

«Геодинамические процессы и природные катастрофы» 27-31 мая 2019 г., г. Южно-Сахалинск; V международной конференции «Триггерные эффекты в геосистемах» 04-07 июня 2019 г., г. Москва; VII научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» 29 сентября - 07 октября 2019 г., г. Петропавловск-Камчатский; X Международной научной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений», 1-5 октября 2019 г., с. Паратунка, Камчатский край.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 115 страницах, включает в себя 38 рисунков, 6 таблиц, 192 библиографические ссылки.

Благодарности. Автор выражает признательность и благодарность научному руководителю к.ф.-м.н. Закупину А.С. за постановку темы работы и общее руководство исследованиями. Искренне благодарю д.ф.-м.н. Богомолова Л.М. за конструктивные предложения при написании настоящей работы. Благодарю коллег из СФ ФИЦ ЕГС РАН и лично Левина Ю.Н. за обсуждение отдельных вопросов по теме диссертации. Автор благодарен соавторам публикаций, в сотрудничестве с которыми были получены интересные научные результаты: к.т.н. Каменеву П.А. и Костылеву Д.В.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулированы цель и основные задачи работы, научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе изложены наиболее общие, концептуальные представления о сейсмическом процессе, основных режимах накопления и диссипации тектонических напряжений, базовых моделях механики сплошной среды, на которые эти представления опираются. Рассмотрены основные материалы о режимах сейсмического процесса, таких как: рои, форшоковые и афтершоковые последовательности. Приведен обзор по выявлению признаков подготовки сильных землетрясений на заключительных этапах в режимах развития сейсмического процесса и аномальном поведении в этот период различных геофизических полей. Результатом обзора является вывод об актуальности исследований по выявлению в сейсмическом режиме о. Сахалин характерных особенностей на заключительном этапе разрушения в очаговой области (на основе анализа сейсмических каталогов).

Во второй главе, посвященной анализу последовательностей сейсмических событий методами LURR и СПП, в п. 2.1 приведены характеристики сейсмических данных, которые использовались для расчетов, описаны возможности сети сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН.

В п. 2.2 описаны основы метода LURR и средства для проведения расчетов по данному методу. Метод LURR был разработан китайскими сейсмологами в 90-х годах [Yin, Yin, 1991; Yin 1993]. При обосновании метода предполагалось, что прогнозным признаком приближения к разрушению сплошной среды в области очага землетрясения является увеличение некоторого параметра, характеризующего различие между нагрузочной кривой $\sigma=f(\epsilon)$ от закона Гука. Авторами [Yin, Yin, 1991] подразумевается, что нагрузочная кривая для главного напряжения и главной деформации может описывать поведение материала среды в области, значительно большей размеров готовящегося очага, под воздействием лунно-солнечных приливов. В этом методе внимание обращено на различие деформационных откликов среды на разных фазах прилива.

В работах [Yin, Yin, 1991; Yin, 1993; Yin et al, 1994] было предложено рассматривать вместо отношения деформационных откликов параметр LURR: отношение откликов потока сейсмических событий на тестовую пригрузку и разгрузку. В качестве тестовых изменений напряжения были выбраны лунно-солнечные приливы. Параметр LURR, Y_m ,

введен для аддитивных величин: сейсмической энергии, деформации Беньоффа и накопления сейсмических событий при помощи следующего соотношения

$$Y_m = \frac{\sum_{i=1}^{N^+} (E_i^m)_+}{\sum_{i=1}^{N^-} (E_i^m)_-} \quad (1)$$

В выражении (1) E_i обозначает сейсмическую энергию события с номером i , которая может быть вычислена по энергетическому классу ($E=10^K$, [Раутиан, 1960]), который в свою очередь связан с магнитудой ($K=1.8M+4$). Знак «+» означает события, произошедшие в период прироста нагрузки, а знак «-» - события при разгрузке. Показатель степени m принимает значения $m=1, 1/2, 0$. При $m=1$ параметр $Y_1=Y_E$ представляет собой отношение выделенной сейсмической энергии в периоды соответственно прироста и уменьшения напряжения вследствие приливов. При $m=1/2$ этот параметр описывает отношение откликов деформации Беньоффа на тех же фазах прилива, $Y_{1/2}=Y_B$. А при $m=0$ он сводится к отношению количества событий N^+, N , произошедших во время нагрузки и разгрузки соответственно. $Y_0=Y_N=N^+/N^-$.

В п.2.3 представлены основы метода СРП и средства для проведения расчетов по данному методу. Сейсмический процесс как таковой можно разграничить на главные толчки, форшоки и афтершоки, роевую и фоновую сейсмичность. Также его можно разделить на стадии активизации, затухания и стационарного развития. В качестве уровня активности сейсмического процесса взят некий параметр x , который характеризует развитие сейсмического процесса во времени и его первая производная во времени dx/dt . Таким образом, последовательности активизации, это такие последовательности, для которых вторая производная будет положительной $d^2x/d^2t > 0$. Математическим эквивалентом процесса затухания будет неравенство $d^2x/d^2t < 0$, а эквивалентом стационарного развития будет являться соотношение $d^2x/d^2t \approx 0$ [Мальшев, 2007].

В работе используется новая версия методики моделирования, которая основана на уравнении саморазвивающихся процессов, предложенном Мальшевым А.И.

$$d^2x/d^2t = k|(dx/dt)|^\alpha \quad (2)$$

В качестве параметра x может использоваться кумулятивная сумма числа сейсмических событий N , либо такая же сумма энергии E , либо сумма для условной высвобожденной деформации D . Модификация методики обеспечила повышенную устойчивость получаемых результатов. В качестве критерия выбора аппроксимационной зависимости используется коэффициент упорядоченности K_{yn} , который рассчитывается по формуле:

$$K_{yn} = \left[n \times (x_n - x_1) \times (t_n - t_1) / \sum (\Delta x_i \times \Delta t_i) \right]^{0.5}, \quad (3)$$

где n – это число точек на аппроксимируемом участке фактических данных, $(x_n - x_1)$ и $(t_n - t_1)$ являются диапазонами изменения фактических данных на данном участке по параметру x и времени t , Δx_i и Δt_i - отклонения каждой точки фактических данных от расчетов кривой по оси абсцисс и по оси ординат [Мальшев, 2017].

Во второй главе теоретически обосновано последовательное использование методов LURR и СРП в рамках общепризнанных концепций тектоники плит и разрушения в области очага подготовки сильных землетрясений. Обоснован выбор основных параметров моделей (настроек алгоритмов) для получения объективного результата по всем расчетным областям, характеризующих высокую воспроизводимость полученных результатов.

Третья глава включает в себя результаты расчетов методами LURR и СРП. Подход для среднесрочной оценки сейсмической опасности LURR позволяет идентифицировать опасность реализации сильного сейсмического события в локальной области (до 200 км) и определяет период тревоги от нескольких месяцев до двух лет [Zakupin et al., 2018]. Исследование по методу LURR проведено для всей территории о. Сахалин в период с 1988

по 2017 гг. (таблица 1). Расчетные зоны представляли собой окружности (эллипсы) с осями в меридиональном и широтном направлениях в 1° (рисунок 1).

Таблица 1 - Землетрясения с $M_w > 5.5$ на о. Сахалин в период с 1988 по 2017 гг.

№	Название	Дата	Координаты	Магнитуда, M_w
1	Нефтегорское	27.05.1995	142.7°E, 52.5°N	7.2
2	Углегорское	04.08.2000	142.4°E, 48.8°N	6.7
3	Пильгунское	12.06.2005	143.7°E, 52.7°N	5.6
4	Горнозаводское	17.08.2006	141.9°E, 46.6°N	5.6
5	Невельское	02.08.2007	141.7°E, 46.8°N	6.2
6	Уангское	16.03.2010	142.2°E, 52.1°N	5.7
7	Онорское	14.08.2016	142.4°E, 50.4°N	5.8
8	Крильонское	23.04.2017	142.0°E, 46.1°N	5.0

Последовательное перемещение окружности по исследуемой территории (с перекрытием 65%) дает положение области, где значение отклонения параметра от единицы (аномалия) наибольшее. При этом использовать расчетную область для о. Сахалин менее 200 км можно лишь на юге, где представительность каталогов выше, чем на севере.

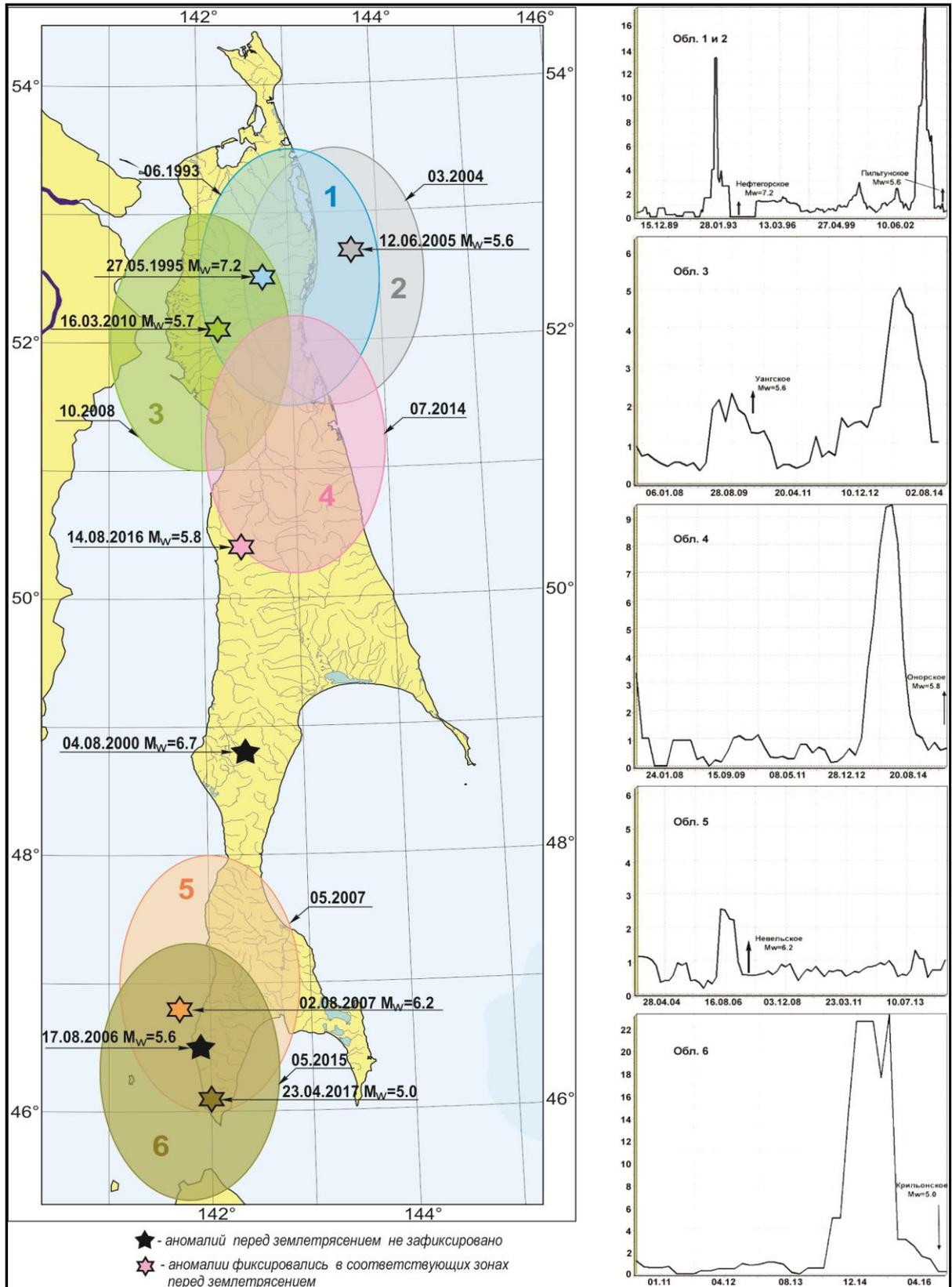


Рисунок 1 - Карта о. Сахалин с указанием областей и периодов времени, в которых зафиксированы аномалии LURR с 1988 по 2017 гг. Звездочками указаны землетрясения: по цвету области аномальных значений – произошедшие в период тревоги, черный цвет – произошли вне периодов аномальных значений LURR

Это ограничение математической обработки, поэтому для единого подхода все расчеты проведены с окружностями радиусом в 1° , удовлетворяющими для всего острова. Были определены области, где вариации параметра LURR превышали фоновый уровень, таких за 30 лет оказалось шесть. На карту острова нанесены эпицентры землетрясений (таблица 1) и области аномальных значений параметра с указанием времени их появления (рисунок 1). Графики вариаций LURR для каждого случая на рисунке вынесены в правой части. Расчет произведен для периодов с большой предысторией (от 3 до 8 лет, в зависимости от длины каталога для конкретного события), для демонстрации отсутствия иных аномалий. Из 8 землетрясений перед двумя не отмечено увеличение параметра, более того, между 48° и 50° таковые не зафиксированы вовсе за весь период. Одно из этих событий произошло в центральной части острова в 2000 г. Второе - на юге острова за год до Невельского землетрясения в августе 2006 г. и, возможно, является зависимым событием от процесса, приведшего к событию в Невельске в 2007 г. В классическом представлении об оценках эффективности метода здесь имеется пропуск этих двух событий. Остальные шесть соответствуют и пространственному и временному распределению «опасных» зон (рисунок 1). Для систематизации графической информации определены основные количественные характеристики установленной связи (пространственная и временная), которые позволяют рассматривать изменения параметра LURR как предвестника землетрясений. В таблице 2 приведены ожидаемые значения параметров по прогнозам в шести аномальных зонах и наблюдаемые значения.

Таблица 2 - Результаты ретроспективного анализа

Название ЗЛТ	Ожидаемые параметры			Наблюдаемые параметры		
	Mw	L ($\pm 1^\circ$)	t, лет	Mw	L ($\pm 1^\circ$)	t, мес.
Нефтегорское	>5.5	143.0°E 52.5°N	несколько	7.2	142.7°E 52.5°N	18
Пильтунское	>5.5	143.0°E 52.5°N	несколько	5.6	143.7°E 52.7°N	15
Невельское	>5.5	142.0°E 47.0°N	несколько	6.2	141.7°E 46.8°N	3
Уангское	>5.5	142.0°E 52.0°N	несколько	5.7	142.2°E 52.1°N	17
Онорское	>5.5	143.0°E 51.2°N	несколько	5.8	142.4°E 50.4°N	24
Крильонское	>5.5	141.8°E 46.3°N	несколько	5.0	142.0°E 46.1°N	23

Примечание – Время от момента обнаружения предвестника до прогнозируемого события (t); положение эпицентра (L)

Методика СРП предполагает выявление форшоковых активизаций, предшествующих заключительной стадии подготовки сильного землетрясения и должна работать много позже, чем появляется признак LURR. Уточнение зоны подготовки по последней методике облегчает задачу поиска зоны для развития форшоковых последовательностей. Разработан непротиворечивый и объективный алгоритм по настройке параметров расчетной модели СРП. В качестве примера подходит юг о. Сахалин, для которого имеется представительный каталог событий с $M \geq 2.0$, а в качестве объекта - Невельское землетрясение 2007 г. Одним из главных вопросов при проведении моделирования является выбор расчетной области. Размер очаговой области для землетрясений с магнитудой от 4 до 6 не может быть более 100 км, а с позиций сеймотектонической модели Сахалина, такие размеры на юге острова перекрывают сразу несколько сейсмогенерирующих областей [Левин и др., 2012]. В этой связи моделирование проведено только для структур близких к зоне Западно-Сахалинского разлома, в связи с чем каталог отсечен по долготе на отметке в 142.2°E , что ограничит его от влияния зоны возможных очагов землетрясений, связанной со структурами Центрально-Сахалинского разлома. Метод СРП применен в режиме сканирования с расчетами в перекрывающихся 28 областях $R=40$ км для полного каталога и каталога слабых землетрясений (с $M < 3.0$) [Закупин, Богинская, 2019].

В каждой области, ретроспективно, начиная с 2007 г., проведены расчеты СРП и при наличии решения зафиксированы его параметры: длительность СРП или задержка времени до события после фиксации решения. Данные занесены в таблицу только для последнего СРП. В зонах, включающих в себя эпицентральную область будущего (Невельского) землетрясения или предыдущего Горнозаводского наблюдались многочисленные активизации, определенные в расчете как СРП (до восьми). Средняя длительность последних СРП в зонах составила порядка месяца. На рисунке 2 показан пример для области с координатами 46.7°N 142.0°E .



Рисунок 2 - Активность в зоне 46.7°N 142.0°E ($R=40$ км) (слева) с указанием области афтершоковой релаксации после Горнозаводского землетрясения 2006 г, а также расчетной области для моделирования СРП (с января по июль 2007 г.). Справа – масштабирование расчетной области (стрелками показаны все имеющиеся решения СРП)

Во всех 28 областях определены периоды сейсмической активизации. Задержки с момента их определения до землетрясения 2007 года варьируются от 5 до 107 дней. Кроме того, в период с августа 2006 по август 2007 гг. в указанных зонах отмечены ложные активизации и их количество в некоторых зонах достигло 8. Полученные результаты указывают на ограниченность явных признаков, по которым можно отличить последний процесс от предыдущих. Выявлено, что затишье очаговой области, в которой впоследствии появляется землетрясение, по времени совпадает с появлением признака LURR (май 2007 г.), а предвестником «правильного» СРП могут быть умеренные события в очаге, которые появляются в процессе активизации или в сопутствующих активных зонах. Таким образом, первоначальная гипотеза о возможности использовать метод саморазвивающихся процессов, как инструмент анализа постпредвестникового периода LURR оправдалась.

Учитывая высокую вовлеченность в представленные саморазвивающиеся процессы событий в области очага Горнозаводского ЗЛТ, осуществлена работа по выделению афтершоковых последовательностей каталога сейсмических событий методом, изложенным в [Смирнов, 1997]. Начальный каталог, состоявший из 242 событий после декластеризации сократился до 114 событий. В области с координатами 46.7°N , 142.0°E и $R=40$ км осталось 36 землетрясений, что указывает на то, что в этой области в наибольшей степени выражено влияние релаксационного процесса после землетрясения в Горнозаводске. На рисунке 3 выделяются 2 процесса, они продолжительны, а последний из них впервые «обнаруживается» 20 июля 2007 г., после чего события 20-29 июля

дополнительно генерируют сильный скачок активности и происходит «залипание» прогнозной оценки по времени.

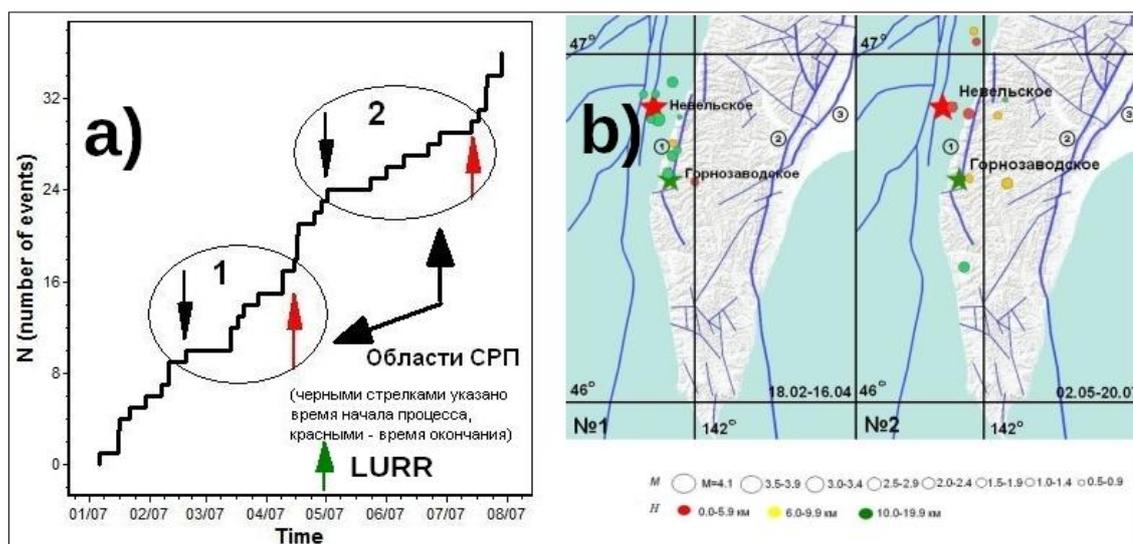


Рисунок 3 - Активность в зоне 46.7°N , 142.0°E ($R = 40$ км) с указанием (цифрами) решений СРП (а), а также начала (черная стрелка) и конца (красная стрелка) расчетной выборки для каждого случая (слева). Справа – эпицентры землетрясений (b), произошедших в периоды активизаций под №1 и №2.

Начало второй аномалии СРП в мае 2007 г. совпадает с появлением предвестника по методу LURR. В первой части работы для отсеки ложных СРП был предложен предвестник LURR, в результате чего из семи активизаций остались только две. После «очистки» каталога, выявлено две аномалии за весь рассматриваемый период, а после предвестника LURR всего одна. Таким образом, для Невельского ЗЛТ «очистка» каталога минимизировала неопределенность при анализе саморазвивающихся процессов, что совпадает с результатом [Tikhonov, Rodkin, 2012].

Метод среднесрочной оценки сейсмической опасности LURR вполне может применяться для территории острова Сахалин независимо, в силу его эффективности. Из восьми ЗЛТ шесть предсказаны с помощью этого метода, из них Онорское и Крильонское в реальном времени, остальные ретроспективно.

В четвертой главе представлены результаты двухэтапного анализа методами LURR и СРП [Закупин и др., 2020]. Расчеты проведены для периода с 2004 по 2018 гг. Это пять землетрясений (таблица 3), расчеты по которым, в том числе, представлены в 3 главе, но для которых имеются каталоги с достаточной представительностью, чтобы использовать в модели СРП. Двухэтапный алгоритм состоял из выявления аномалий во временных распределениях LURR, выбора расчетной области для моделирования СРП в зоне аномальных значений и расчет СРП после появления среднесрочного прогнозного признака. Учитывая, что в активных сейсмических зонах, например южной части Западно-Сахалинского разлома, где произошло Невельское землетрясение, сейсмический режим периодически переходит в состояние СРП (см. главу 3), то ограничение периода для обработки методом СРП и является основной задачей для метода LURR.

событий по времени и выделяется аномалия, имеющая непосредственное отношение к Невельскому ЗЛТ. При уточнении времени аномалии в [Закупин, 2016] показано, что аномалия произошла в мае 2007 г. Выборка (16.09.2006-02.08.2007 гг.) для расчета включила в себя 243 землетрясения. В данной зоне после Горнозаводского землетрясения выявлено два релаксационных процесса. В конце 2006 года наблюдалась аномалия СРП, которая потом перешла в стадию релаксации (рисунок 5а). К маю 2007 года режим стабилизировался. Определено решение для СРП (рисунок 5б).

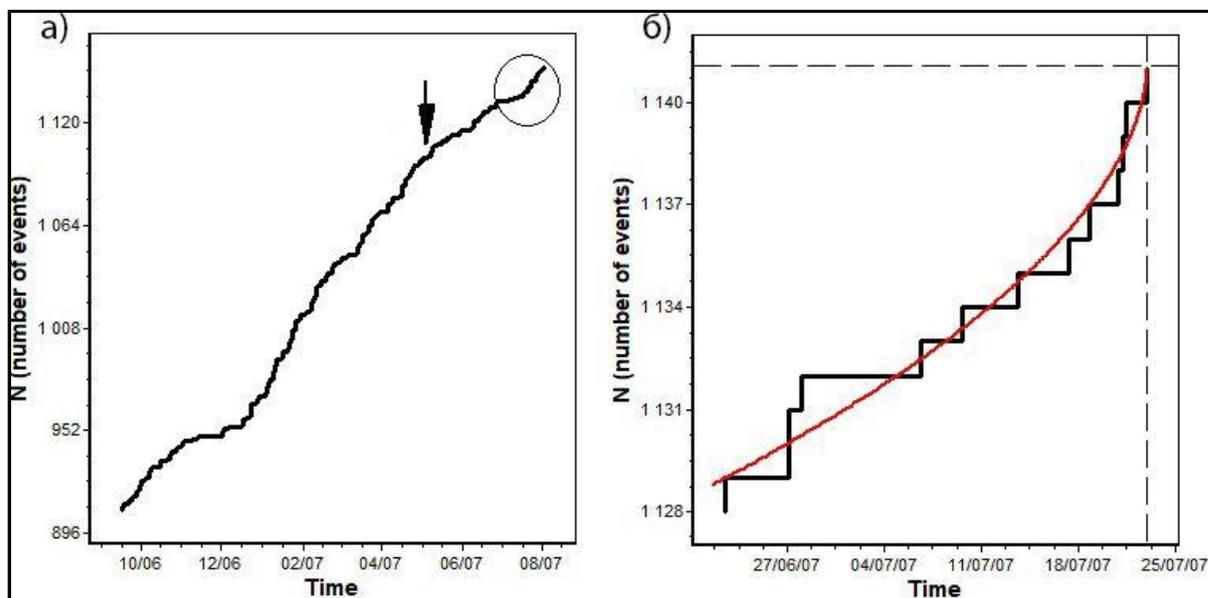


Рисунок 5 - Расчетные кривые по методу СРП для Невельского землетрясения 02.08.2007 г.: а) общая картина развития сейсмического процесса с предысторией (стрелкой указано время появления аномалии LURR, отмечена область возникновения признака область СРП); б) решение по СРП для выделенной области

Для систематизации полученных результатов сравним следующие характеристики для описания сейсмического процесса от времени появления аномалий LURR до выхода в режим активизации (СРП): 1) время появления аномалии LURR t_1 ; 2) возможная неопределенность в интерпретации (количество режимов с ускорением после LURR и до сильного ЗЛТ). Так как расчеты показали, что оценки значения T_a (в методе СРП T_a определяет положение асимптоты и обозначает точную дату прогнозируемого события) во всех случаях не соответствуют заявленной в методе точности, то необходимо брать в расчет не полученные решения, а наличие решения как такового. Этот вариант переводит оценки по методу СРП из разряда краткосрочных в среднесрочные оценки (месяцы-дни). Поэтому в таблице 4 приводится наличие возможного решения СРП по первой дате его определения t_2 . Оценка эффективности в определении времени прогноза происходит по разнице между t_3 и t_2 .

Таблица 4 – Результаты двухстадийного моделирования

Название ЗЛТ	t_3 (дата ЗЛТ)	t_1 (время появления аномалии LURR)	Кол-во решений по СРП после t_1	Наличие решения	t_2 (дата последней точки СРП)	$t_3 - t_2$ (в днях)
Онорское	14.08.2016	07.2014	1	да	24.03.2015	492
Уангское	16.03.2010	10.2008	1	да	24.02.2010	20
Пильтунское	12.06.2005	03.2004	1	да	01.06.2005	11
Крильонское	23.04.2017	05.2015	2	да	05.02.2017	77
Невельское	02.08.2007	05.2007	2	да	22.07.2007	11

Таким образом показано, что после появления аномалии LURR период тревоги в несколько лет можно уменьшить, так как сильные землетрясения в итоге происходят по завершению одного из последующих СРП. В случае Онорского землетрясения после первой выделенной аномалии СРП не произошло сильное событие. В то же время наблюдается активизация за считанные недели перед землетрясением. Однако, математический расчет в программе не даёт решение для СРП – не хватает точек, т.е. мало землетрясений. Чтобы не нарушать принципов в трактовке результатов, время ожидания было получено по первому СРП.

Основным результатом работы, который был достигнут при двухстадийном моделировании сейсмической опасности на о. Сахалин, является новый инструмент для прогноза с высокими показателями эффективности, что подтверждено при прогнозах в реальном времени. Показано, что использование метода СРП для прогноза оправдано, если параметр Y_B , вычисляемый по распределению сейсмических событий по временным интервалам и характеризующий отклонение этого распределения от равновероятного, становится больше единицы. Метод, использующий изменения во времени этого параметра (называемого также параметром LURR) позволяет определить время перехода состояния среды в стадию упругопластическую, которая сопровождается снижением сейсмической активности. Для саморазвивающегося процесса - эта стадия есть стабилизация скорости накопления событий с последующим переходом к режиму с обострением. В рамках двухстадийной модели выполнены расчеты для 5 самых сильных землетрясений на о. Сахалин за 2004-2018 гг. по методу СРП в областях аномальных значений LURR, начиная со времени появления предвестника. Выявлено, что в период между аномалиями LURR и сильными землетрясениями для 3 случаев из 5 были зафиксированы по два решения модели СРП, что можно рассматривать как «ложную тревогу». Сам по себе среднесрочный прогноз сильных землетрясений по методу LURR независим от других методов. А для СРП требуется дополнительная информация по положению расчетной зоны и отсечка по времени (начало расчета), что и дает метод LURR. В итоге, была предложена последовательность оценки сейсмической опасности на Сахалине благодаря уточнению времени переходов между различными режимами сейсмического процесса: от фонового - к подготовке очага (стадии LURR - предвестника) и от режима сравнительно «медленной» подготовки - к режиму с ускорением (СРП). Совместное использование двух методов анализа режимов сейсмичности и прогноза сейсмической опасности на о. Сахалин значительно улучшает точность определения времени прогнозируемого события.

Заключение

В диссертационной работе на основании выполненных исследований получены следующие основные результаты:

1. Методы исследования сейсмического режима LURR и СРП теоретически обоснованы для их последовательного применения в подходе к оценке сейсмической опасности на о. Сахалин.
2. Подтверждено, что снижение параметра LURR после своего максимального показателя, свидетельствует о переходе геосреды в состояние неустойчивости, в котором любой режим с ускорением, определяемый как саморазвивающийся процесс, может быть иницирующим для главного события.
3. Впервые предложена последовательность оценки сейсмической опасности на Сахалине благодаря уточнению времени переходов между различными режимами сейсмического процесса: от фонового к подготовке очага (стадии LURR -

предвестника) и от режима сравнительно «медленной» подготовки режиму с ускорением (СРП).

4. Совместное применение методов LURR и СРП позволяет улучшить точность определения времени ожидаемого события (от нескольких лет по данным LURR до месяцев-дней по данным СРП при существенном снижении количества ложных тревог свойственных СРП). После появления предвестника LURR в течение 1-2 лет сейсмический процесс переходит в режим с ускорением (определяемый как саморазвивающийся процесс, реализующийся от недели до 2.5 месяцев до сильного землетрясения).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, входящие в список ВАК по специальности 25.00.10 - Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых:

1. Закупин А.С., Дудченко И.П., **Богинская Н.В.**, Костылев Д.В., Каменев П.А. Изучение сейсмического режима на острове Матуа в комплексной экспедиции 2017 г. // Вестник ДВО РАН. – 2018. – № 1. – С. 161-167.
2. Закупин А.С., **Богинская Н.В.**, Андреева М.Ю. Методические аспекты исследования форшоковых последовательностей методом СРП (саморазвивающиеся процессы) на примере Невельского землетрясения на Сахалине // Геосистемы переходных зон. – 2019. – Т. 3, № 4. – С. 377-389.
3. Каменев П.А., Костылев Д.В., **Богинская Н.В.**, Закупин А.С. Геофизические исследования в южной части Центрально-Сахалинского разлома с использованием нового комплекса оборудования // Геосистемы переходных зон. – 2019. – Т. 3, № 4. – С. 390-402.
4. Закупин А.С., Богомолов Л.М., **Богинская Н.В.** Применение методов анализа сейсмических последовательностей LURR и СРП для прогноза землетрясений на Сахалине // Геофизические процессы и биосфера. – 2020. – Т. 19, № 1. – С. 66-78.

Публикации, проиндексированные в WOS:

1. Zakupin A.S., Levin Yu.N., **Boginskaya N.V.**, Zherdeva O.A. Development of medium- term prediction methods: A case study of the August 14, 2016 Onor (Mw=5.8) earthquake on Sakhalin // Russian Geology and Geophysics. – 2018. – V. 59. – P. 1526-1532.

Публикации, проиндексированные в SCOPUS:

1. Kostylev D.V., Bogomolov L.M., **Boginskaya N.V.** About seismic observations on Sakhalin with the use of molecular-electronic seismic sensors of new type // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – No. 324 (012009). DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012009>

Публикации в рецензируемых журналах, входящие в список РИНЦ:

1. Закупин А.С., Каменев П.А., Воронина Т.Е., **Богинская Н.В.** Оценка сейсмической опасности на юге Сахалина на 2018 год (по данным оперативного каталога) // Геосистемы переходных зон. – 2018. – Т. 2. – № 1. – С. 52-56.
2. Закупин А.С., **Богинская Н.В.** Современная сейсмичность в районе Центрально-Сахалинского разлома (юг о. Сахалин): ложная тревога или отодвинутый прогноз? // Геосистемы переходных зон. – 2019. – №1. – С. 27-34.